随钻 D-T 源中子孔隙度测井响应分析

席习力 [1]　张锋 [2]　陈前 [1]　钟路予 [2]
1（中石化经纬有限公司　青岛 266075）
2（中国石油大学（华东）　青岛 266580）

摘要　随钻中子孔隙度测量通过测量热中子计数，评价地层减速长度从而获得地层孔隙度，是一种地层储集性评价的重要方法，被广泛应用在复杂油气田的勘探开发中。随钻 D-T 源中子孔隙度测井仪器由脉冲中子源和多探测器组成，随钻可控源中子孔隙度响应规律受仪器钻铤结构及仪器测量方式的影响，同时井眼参数、流体类型和地层等因素影响仪器周围的中子场分布及测井响应规律。本文利用蒙特卡罗模拟方法，研究不同钻铤结构及仪器设计、仪器测量环境因素和地层参数对随钻 D-T 源中子孔隙度测量过程中子通量分布与孔隙度响应规律的影响。仪器钻铤结构与测量环境影响分析结果表明，仪器采用侧开槽设计时探测器计数变大，但地层孔隙灵敏度仅为导流通道环绕设计的 0.36 倍，并明确钻铤尺寸是测量环境影响的主控因素。地层岩性、泥质含量和地层水矿化度的地层环境因素影响分析结果显示，岩性作为地层属性在不同孔隙度下的影响几乎为常量，泥质含量的影响程度在低孔条件下是地层水矿化度影响程度的 2.9 倍，高孔隙度下为 1.48 倍，因此地层泥质含量为地层环境影响的主控因素。

关键词　随钻测井；中子孔隙度；蒙特卡罗模拟；环境影响因素校正；
中图分类号　TE19

Response Analysis of Neutron Porosity Logging with Drilling D-T Source

Linhua Guan[1]　Feng Zhang[2]　Qian Chen[1]　Luyu Zhong[2]
1(*Sinopec Matrix Corporation, Qingdao 266075, China*)
2(*China University of Petroleum (East Chin), Qingdao 201800, China*)

Abstract　Neutron porosity measurement with drilling, by measuring thermal neutron counts to evaluate the formation deceleration length and thus obtain the formation porosity, is an important method for formation reservoir evaluation and has been widely used in the exploration and development of complex oil and gas fields. The D-T source neutron porosity logging instrument with drilling consists of a pulsed neutron source and a multi-detector. The neutron porosity response is affected by the instrument structure and measuring method of the instrument, while factors such as borehole parameters, fluid parameters and stratigraphy can affect the neutron field distribution around the tool and the logging response. In this paper, Monte Carlo simulation methods are used to study the effects of different drill structures and instrument designs, environment factors of instrument measurements and formation parameters on the neutron flux distribution and porosity response. The analysis shows that the detector count increases with the side slotted design, but the formation porosity sensitivity is only 0.36 times that of the infiltration channel wrap-around design. The drill size is the main controlling factor for the impact of the measurement environment. The analysis results about formation environmental, including formation lithology, mud content and formation water mineralization, show that the influence of lithology on the measurement results is almost constant. In low porosity, the mud content is 2.9 times that of the formation water mineralization, and in high porosity, it is 1.48 times. Therefore, the mud content of the formation is the dominant controlling factor in the influence of the stratigraphic environment.

Key words　Logging with drilling; neutron porosity; Monte Carlo simulation; correction for environmental influences;

第一作者：席习力，男，中国石油大学地球物理学专业本科，1985 年 9 月 18 日出生。
通讯作者：张锋，E-mail: zhfxy_cn@upc.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

随着油藏开发向着规模更小、油层更薄、裂缝油藏、物性差的边缘油藏深入，地层参数的随钻测量能有效减小泥浆侵入的影响提高测量精度，对钻进导向与后续开发具有重要意义。地层孔隙度是储集性评价的重要参数，目前测量方法主要包括声波孔隙度和中子孔隙度测量方法，其中中子孔隙度利用中子的地层减速长度与热中子通量的关系，得到地层的含氢量并实现地层孔隙度的计算。近年来，随着可控中子源替代传统化学源、实现“无源化”测量已成为核测井发展的主要趋势，脉冲中子发生器已被应用于实际随钻中子孔隙度仪器中。

可控中子源产生的中子进入地层后与地层原子核发生相互作用，并发生非弹性散射、弹性散射等反应，最终慢化为能量 0.025eV 的热中子。随钻中子孔隙度测井主要与快中子的减速过程和热中子俘获与扩散形成的热中子空间分布有关，不同于常规的补偿中子孔隙度，随钻中子孔隙度的测量精度低，前人主要从仪器设计及孔隙度计算方法两个方面提高随钻中子孔隙度的准确度。张锋（2010）提出使用 D-T 脉冲中子发生器代替传统 241Am-Be 中子源进行随钻中子孔隙度测量时，通过增加源距保障仪器灵敏度及探测深度[1]；Zhang Q（2010）通过对比随钻和电缆测井特性改进了随钻测井探测器屏蔽体结构[2]；骆庆锋（2015）研究钻铤结构的影响发现在钻铤侧壁开槽放置中子发生器、中子探测器在增加探测深度的同时提高了仪器相对灵敏度[3]；李伟（2017）针对随钻中子孔隙度仪器探测器中子计数受高压引发的瞬间脉冲的干扰准确度下降的问题，设计了一种抗干扰装置，并在实际应用中取得了良好的效果。由于随钻可控源中子孔隙度测量结果易受钻铤及其它测量环境影响[4]。付亚平（2013）研究发现井眼形状、井内介质密度会对随钻中子孔隙度测量值产生影响，而井内介质矿化度对测井值较小[5]。袁超（2016）发现岩性、泥质含量、井眼尺寸的变化对随钻中子视孔隙度的影响大于电缆测井，为环境影响因素校正提供了依据[6]；Daghar A、Budebes（2013，2015）运用典型相关分析建立空间模型，模拟随钻过程中侵入流体对结果的影响。针对井内特殊流体建立了中子孔隙度校正公式，通过处理实测井资料验证了校正公式的可靠性[7][8]； McCleskey M（2017）通过模拟井眼与地层环境温度变化对随钻中子孔隙度测井响应的影响，提出利用实验模拟校正井眼温度影响的方法[9]

1 随钻中子孔隙度测井原理

中子在地层的输运与扩散过程符合玻尔兹曼输运方程，已知介质的宏观俘获截面为Σ_a，中子的通量为ϕ，则每秒单位体积（立方厘米）地层吸收的中子数$\Sigma_a\phi$满足如下定态扩散方程：

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + S = 0 \tag{2-1}$$

中子在地层中的减速过程分为两个阶段，即快中子减速阶段和热中子扩散阶段。假设无限厚均匀球状介质中有点中子源，根据中子源条件与边界条件，在距离中子源距离 r 处的快中子通量密度为：

$$\phi_e(r) = \frac{1}{4\pi D_e r} e^{-r/L_e} \tag{2-2}$$

热中子的通量分布为：

$$\varphi_t(r) = \frac{L_t^2}{4\pi D_t(L_e^2 - L_t^2)}\left(\frac{e^{-r/L_e}}{r} - \frac{e^{-r/L_t}}{r}\right) \tag{2-3}$$

公式（2-2）和公式（2-3）合称为双组扩散理论，式中$\phi_e(r)$、$\phi_t(r)$分别代表 r 处的快中子通量和热中子通量；L_e、L_t分别代表快中子的减速长度和热中子的扩散长度；D_e和D_t分别为快中子和热中子扩散系数。

通过分析式（2-3）可知，空间中热中子通量密度的分布不仅取决于地层的减速能力，还与地层的中子扩散、俘获能力有关（D_t、L_t），表 2-1 列举了常见地层矿物及流体的减速长度与扩散长度。

表 2-1 常见矿物及流体的中子参数

Neutron parameters of common minerals and fluids

物质	物质组分	减速长度 L_e/cm	扩散长度L_t/cm
硬石膏	C_aSO_4	27	8.17

淡水	H_2O	2.7	2.4
石膏	$C_aSO_4\cdot 2H_2O$	11	3.6
赤铁矿	Fe_2O_3	34	2.3
方解石	C_aCO_3	35	9.5
石英	SiO_2	37	17.0
高岭土	Fe_2O_3	19.6	9.5
磁铁矿	Fe_3O_4	9.3	2.3

空间中的热中子通量分布与地层的减速能力和俘获能力有关，既受地层含氢量的影响，也受地层含氯量的影响。而地层的减速能力取决于岩石的含氢量，而组成岩石的矿物氢元素含量很低，岩石中的氢元素主要以水或烃的形式存在于孔隙当中，地层中的水在孔隙中主要为可动水和束缚水两种形式，而孔隙中的烃主要为石油和天然气，不论是何种形式，地层中的氢元素主要分布与岩石孔隙中，因此利用探测得到的地层热中子信息，即可反映地层含氢量，从而确定地层孔隙度。

随钻可控源中子孔隙度采用可控源及近、远双探测器系统进行测量，已知探测器测量点处热中子计数率N_t与热中子通量$\varphi_t(r)$成正比，分别用$N_t(r_1)$、$N_t(r_2)$表示随钻中子孔隙度仪器的近、远探测器热中子计数率，r_1、r_2分别表示近、远热中子探测器源距（$r_1 < r_2$），则随钻中子孔隙度仪器探测器热中子通量比如下所示：

$$\frac{N_t(r_1)}{N_t(r_2)} = \frac{r_2}{r_1}\frac{e^{-r_1/L_e}-e^{-r_1/L_t}}{e^{-r_2/L_e}-e^{-r_2/L_t}} \tag{2-4}$$

由表 2-1 可知，地层中的快中子减速长度L_e通常近似于热中子扩散长度L_t的两倍，热中子扩散长度L_t相比快中子的减速长度L_e小很多，因此当源距足够大时，公式（2-1）中含有L_t的指数项与含有L_e指数项相比其结果可以忽略不计[10]，所以公式（2-1）可近似表达为下式：

$$\frac{N_t(r_1)}{N_t(r_2)} = \frac{r_2}{r_1}e^{-(r_1-r_2)/L_e} \tag{2-5}$$

由上式可得，当源距r_1和r_2选定后，随钻中子孔隙度仪器的探测器比值仅与减速长度L_e有关，探测器的热中子计数率比值 R 反映了地层含氢量，即地层孔隙度；随钻中子孔隙度仪器就是通过记录仪器近、远探测器两个位置的热中子计数的比值 R 完成地层孔隙度大小的测量。

随钻中子孔隙度仪器测量得到的近、远探测器热中子计数率比值 R 与地层孔隙度φ存在如下所示的响应关系：

$$R = A + B\phi + C\phi^2 \tag{2-6}$$

式（2-6）中，A、B、C 为随钻中子孔隙度响应待定系数；R 为仪器近远探测器热中子计数率比值；ϕ为地层孔隙度（%）。

2 随钻中子孔隙度测井响应规律

本文利用蒙特卡罗模拟软件 Fluka 对随钻 D-T 源中子孔隙度测井的响应进行分析。Fluka 是一种通用的粒子传输和与物质相互作用的计算软件，可模拟不同类型粒子的输运及相互作用过程，由于其操作的方便性与结果的准确性，该方法在核测井方法基础和应用研究中发挥了巨大作用。其应用领域涵盖了从质子和电子加速器屏蔽到目标设计、活化、剂量计、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、放射治疗等。

2.1 随钻中子孔隙度仪器模型建立

建立如图 3-1 所示的随钻 D-T 中子孔隙度仪器模型，地层模型为裸眼地层模型，由钻铤、导流通道、双探测器脉冲中子孔隙度仪器组成的随钻孔隙度仪器放置于相匹配尺寸的井眼中；钻铤为钢，探测器为 He-3 热中子探测器，探测器源距分别为 45cm 和 68cm，各探测器间有合适厚度的钨镍铁屏蔽体。该仪器被放

置在井孔直径为 200mm 的标准尺寸井眼中，地层半径 70cm，井眼流体填充淡水。在 Fluka 中输入文件中应用 LOW-MAT 卡启用低能中子输运过程并指定低能中子截面库，通过 USRYIELD 实现探测器的热中子通量的记录。

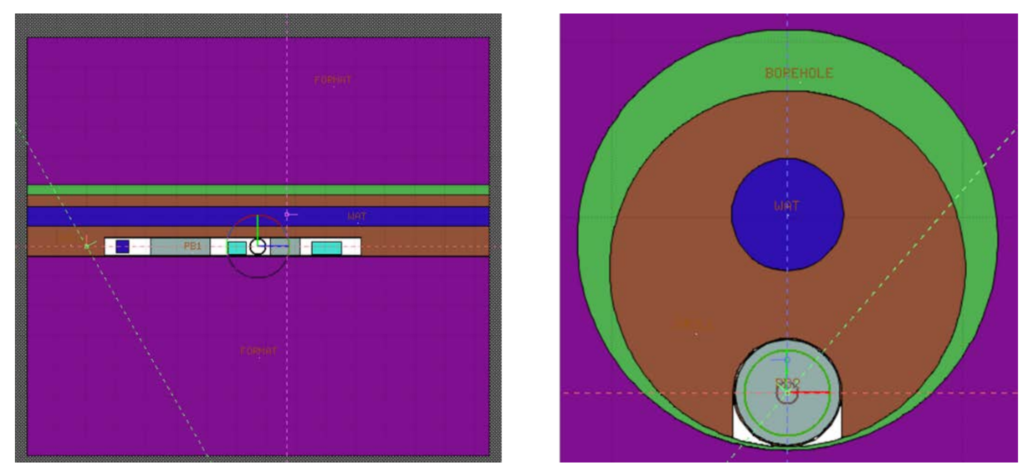
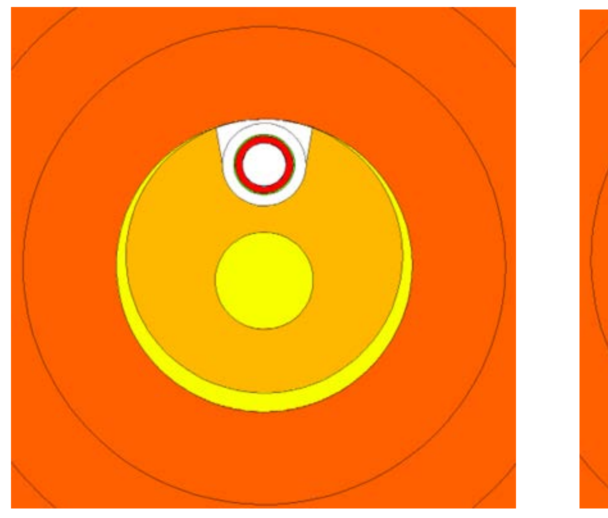


图 3-1 随钻中子孔隙度地层计算模型侧剖图（左）和俯视图（右）
Fig.3-1　Side view (left) and top view (right) of Neutron porosity simulation modeling with drilling

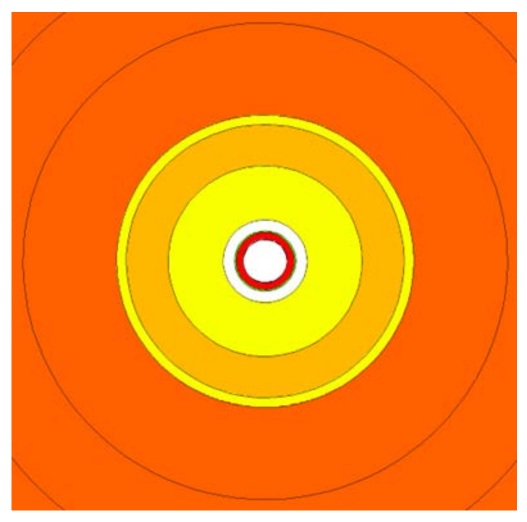
2.2　不同随钻仪器结构中子孔隙度响应规律

2.2.1 不同仪器摆放位置中子孔隙度测量响应

随钻中子仪器需要考虑测量仪器与导流通道在钻铤中的相对位置，常见的仪器摆放位置分为侧开槽和导流通道环绕两种，如图 3-2 所示。仪器侧开槽排布时，导流通道在钻铤内部，包含源和探测器的中子孔隙度测量仪器放在钻铤一侧，仪器直接贴靠地层测量；导流通道环绕时，仪器与导流通道均位于钻铤轴心，仪器放置于导流通道中，导流通道呈圆环状包围仪器。



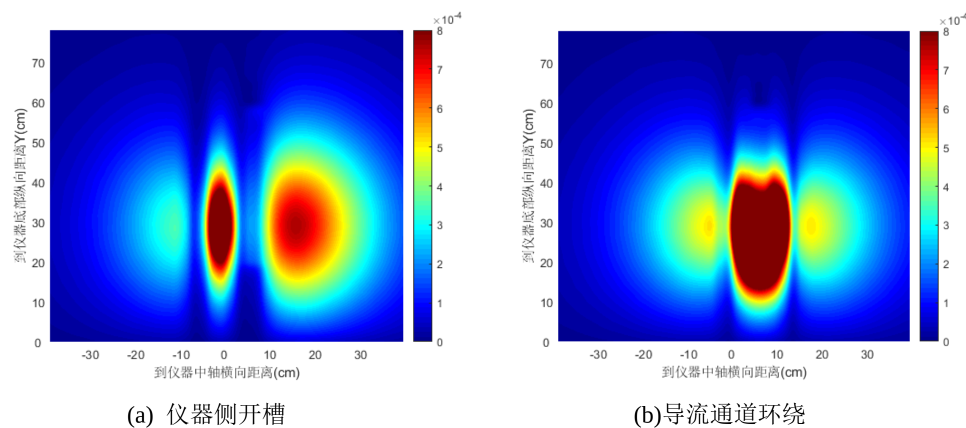
(a) 仪器侧开槽



(b)导流通道环绕

图 3-2　仪器摆放位置横截面示意图
Fig.3-2　Top view of Instrument location in the drilling

测量仪器的侧开槽放置与导流通道环绕放置影响中子场分布，为了定性研究仪器放置位置对热中子场分布的影响，记录侧剖面的热中子场分布，如图 3-3 所示，左图为仪器侧开槽，右图为导流通道环绕放置。场分布结果显示，侧开槽设计时热中子主要集中在开槽一侧的地层，背向地层的热中子通量很低；仪器居中放置时，两侧地层的热中子通量基本相同，地层热中子通量小于侧开槽方式开槽一侧的地层热中子通量，同时由于钻铤和仪器周围导流液的减速作用，井筒及仪器内部的中子通量远高于侧开槽。



(a) 仪器侧开槽　　　　(b)导流通道环绕

图 3-3　不同仪器摆放位置的热中子场分布

Fig.3-3　Thermal neutron field distributions for different instrument location

记录不同仪器摆放位置时热中子近远计数比 R 随地层孔隙度变化的响应，如图 3-4 所示。与仪器居中放置相比，仪器侧开槽放置时中子受仪器和导流通道流体的减速和吸收作用更小，因此近远探测器的计数更大，同时计数比响应灵敏度变小，导流通道环绕放置时近远计数比对地层孔隙度的灵敏度为侧开槽的 2.7 倍。

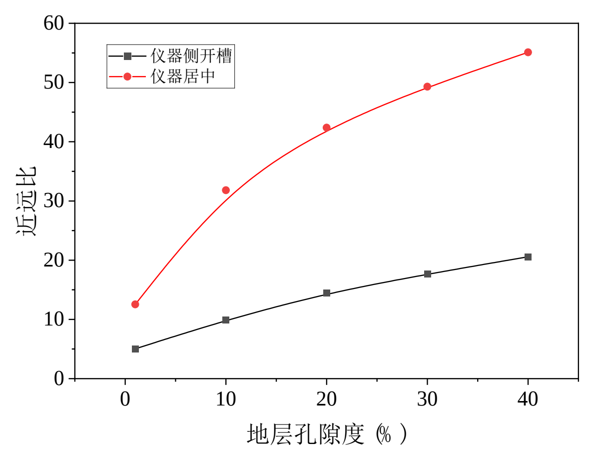
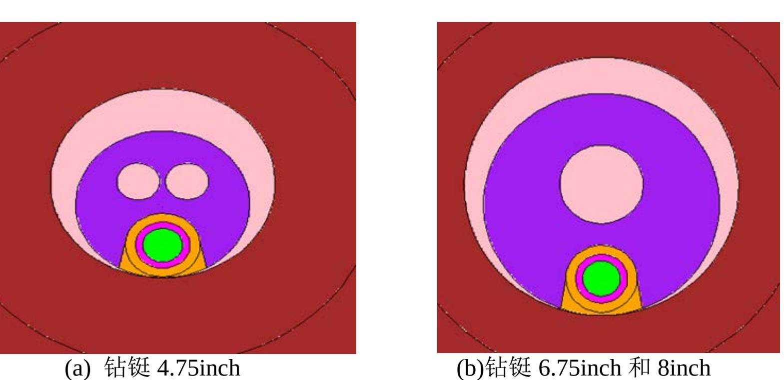


图 3-4　仪器摆放位置的中子孔隙度响应

Fig.3-4　Neutron porosity response of instrument location

2.2.2 不同钻铤尺寸中子孔隙度测量响应

井孔转进过程中，不同尺寸的井眼需要配套使用相应尺寸的钻铤，不同尺寸钻铤中导流通道结构也有一定差异，常见的钻铤尺寸包括 4.75inch，6.75inch 和 8inch。为了研究钻铤尺寸对随钻中子孔隙度测井响应的影响，改变钻铤和泥浆导流通道的结构与尺寸，钻铤尺寸为 4.75in 时设置直径为 3cm 的双泥浆导流通道，钻铤尺寸为 6.75in 和 8in 时分别设置直径为 6.1cm 和 9.6cm 的单泥浆导流通道，仪器横截面图如图 3-5 所示。

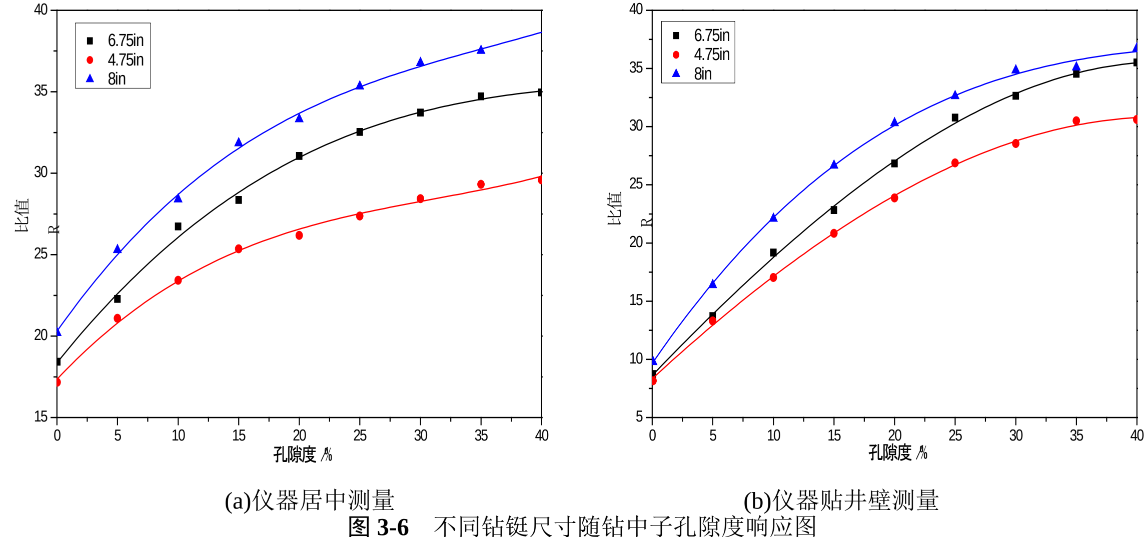


(a) 钻铤 4.75inch　　　　(b)钻铤 6.75inch 和 8inch

图 3-5　钻铤横截面图示意图

Fig.3-5　Top view of different drilling sizes

建立蒙特卡罗模型，井眼直径 31.12cm，井眼流体淡水填充，改变地层孔隙度，设置仪器在井中居中测量与贴壁测量。不同钻铤尺寸条件下近远探测器热中子计数率比值 R 随地层孔隙度的结果如图 3-6 所示。



(a)仪器居中测量　　　　　　　(b)仪器贴井壁测量

图 3-6　不同钻铤尺寸随钻中子孔隙度响应图

Fig.3-6　Neutron porosity response of different drilling sizes

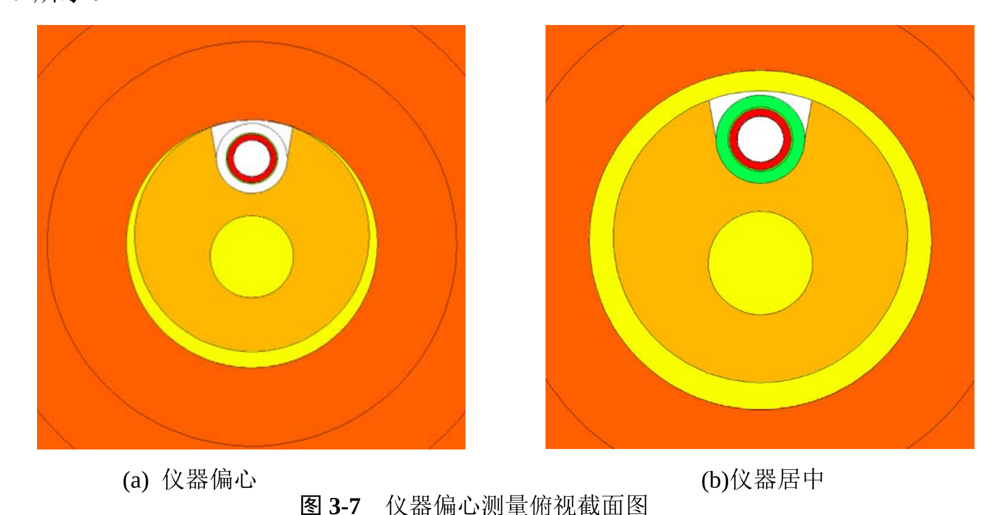
与地层和井眼水相比，钻铤对中子的减速作用非常强，同时钻铤的热中子衰减特别强，因此钻铤尺寸大小对远探测器的计数率影响尤为明显。热中子近远计数比 R 随钻铤尺寸的增加而增加，仪器居中测量时计数比 R 大于贴壁测量。

3　随钻中子孔隙度测井环境影响规律

3.1　测量环境影响规律

3.1.1　仪器偏心测量的影响

随钻仪器在测量中固定在钻铤上并随钻头旋转，在测量过程中由于井壁不规则、钻头钻进导向发生偏转等原因导致仪器偏心测量。仪器与井壁间隙的水层厚度影响热中子平均减速长度，为了研究仪器偏心对孔隙度响应的影响，保持井孔直径 20cm，改变仪器的偏心距离为 0cm（仪器居中）、0.7cm、1.4cm（仪器贴井壁），如图 3-7 所示。

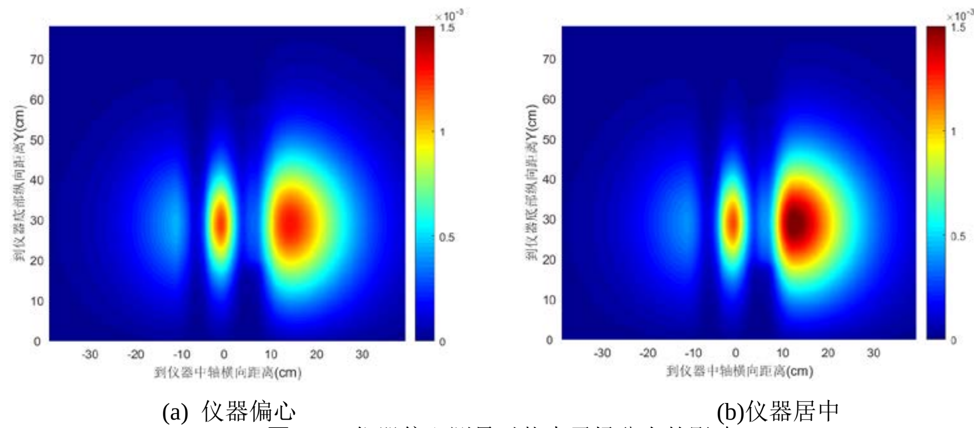


(a) 仪器偏心　　　　　　　(b)仪器居中

图 3-7　仪器偏心测量俯视截面图

Fig.3-7　Tool eccentricity and centering measurements

仪器与井孔间的流体对出射中子在井眼及地层的中子场分布有影响，为了定性研究偏心对中子减速长度及热中子场分布的影响，记录仪器地层剖面的热中子场分布，如图 3-8 所示，左图为仪器贴井壁，右图为仪器居中。显然，与井眼流体相比，地层的减速能力更低；因此仪器贴井壁时，探测范围内减速能力弱，热中子计数通量降低。



(a) 仪器偏心　　　　　　　　　　　　　　(b)仪器居中

图 3-8　仪器偏心测量对热中子场分布的影响

Fig.3-8　Thermal neutron field distributions for eccentricity and centering measurements

记录不同偏心条件下仪器热中子近远计数比 R 随地层孔隙度变化的响应，如图 3-9 所示。随着偏心距离的增加，仪器与井壁间井眼流体厚度减小，中子的减速能力变差，远探测器相对于近探测器具有更高的敏感性，远探测器相对变化幅度更大。因此，在相同地层条件下随着偏心距离的增加，中子减速长度变大，探测器计数比 R 减小。

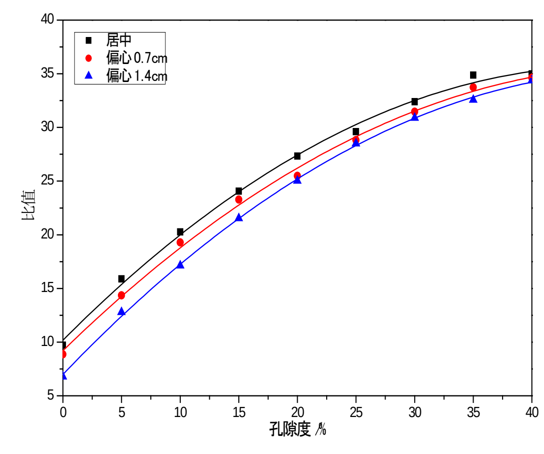
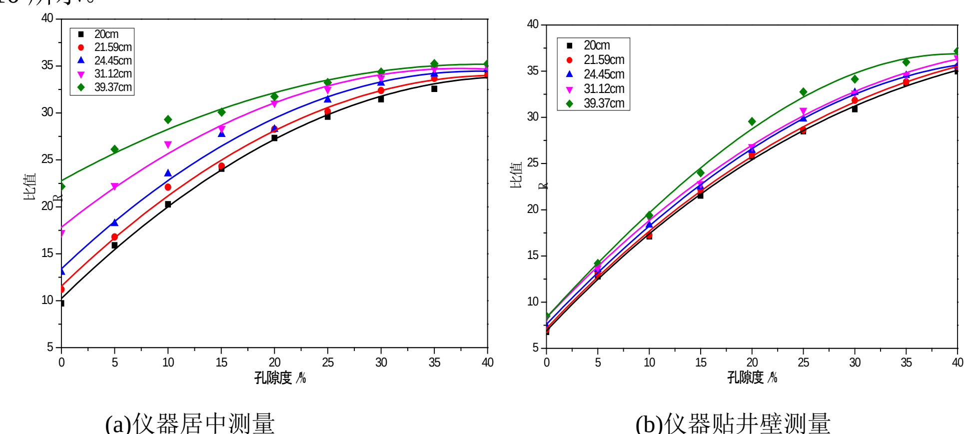


图 3-9　不同仪器偏心距离仪器响应规律图

Fig.3-9　Neutron porosity response of different eccentricity

3.1.2 井眼尺寸的影响

为了研究井眼尺寸对中子孔隙度响应的影响，改变模型井眼尺寸为 20cm（7.87in）、21.59cm（8.5in）、24.45cm（9.63in）、31.12cm（12.23in）、39.37cm（15.5in），在如图 3-7 所示的贴壁和居中两种测量模式下，模拟得到不同井眼尺寸条件下，随钻 D-T 源中子孔隙度仪器近远热中子计数率比值 R 随地层孔隙度的变化规律，如图 3-10 所示。



(a)仪器居中测量　　　　　　　　　　　　(b)仪器贴井壁测量

图 3-10　不同井眼尺寸仪器响应规律图

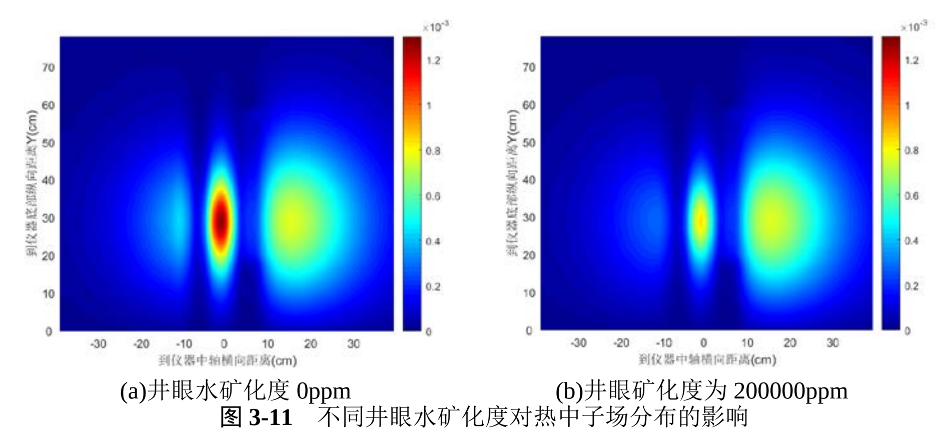
Fig.3-10　Neutron porosity response of borehole sizes

在仪器居中测量时，近远计数比 R 随井眼尺寸的增大而增大，小尺寸井眼下近远计数比对地层孔隙度的响应更灵敏；仪器贴壁侧量时，地层低孔条件下，近远计数比 R 受井眼尺寸的影响远小于仪器居中。通过对比仪器按两种测量方式得到的响应规律可知，仪器居中测量结果受井眼尺寸影响差异显著，特别是在低孔隙度地层中。这与井眼流体的减速作用有关，仪器居中测量时与井壁间的井眼流体厚度增加，仪器周围物质的中子减速能力增大使得近远探测器热中子计数率比值增大；而仪器贴井壁测量时，由于钻铤一侧紧贴井壁，探测器计数率受井眼流体影响很小，仪器更能真实反映地层信息。

3.1.3 井眼水矿化度的影响

矿化水中的氯元素对热中子有非常剧烈的俘获，对探测器的热中子场分布影响特别大。为了研究井眼水矿化度对随钻中子孔隙度响应的影响，改变井眼流体矿化度分别为 0、50000ppm、100000ppm、150000ppm、200000ppm；在如图 3-7 所示的贴壁和居中两种测量模式下，研究模拟不同井眼水矿化度下热中子场分布和计数比的地层孔隙度响应规律。

井眼水矿化度对井眼及地层中的热中子场分布有影响，为了定性研究井眼水矿化度对热中子的俘获影响，记录仪器地层剖面的热中子场分布，如图 3-11 所示。左图为仪器贴井壁时井眼矿化度为 0，右图为井眼矿化度为 200000ppm。结果显示，井眼流体矿化度对热中子场分布的影响主要在井眼区，对地层区的热中子场分布影响较小。

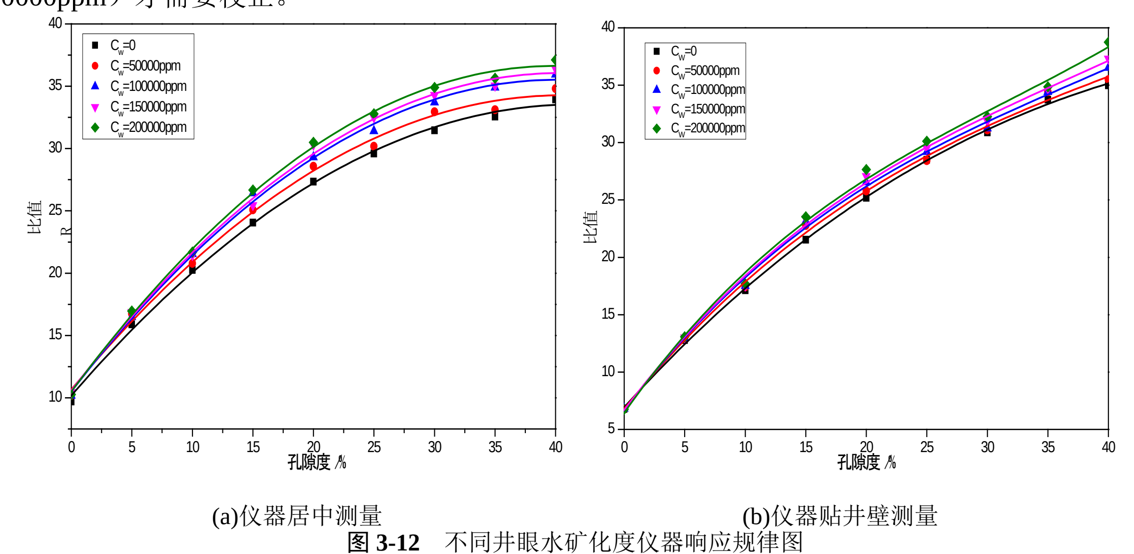


(a)井眼水矿化度 0ppm (b)井眼矿化度为 200000ppm

图 3-11 不同井眼水矿化度对热中子场分布的影响

Fig.3-11 Thermal neutron field distributions for different borehole water mineralizations

记录居中测量和贴井壁测量条件下，井眼水矿化度对探测器近远比的影响。随着地层水矿化度的增大，井眼区对热中子的俘获作用增强，近远探测器的响应灵敏度存在差异，计数比增大。对比仪器居中和贴井壁两种测量方式，贴壁测量结果受井眼矿化度影响小，能更真实的反应地层实际孔隙度，仅在高矿化度下（>100000ppm）才需要校正。



(a)仪器居中测量 (b)仪器贴井壁测量

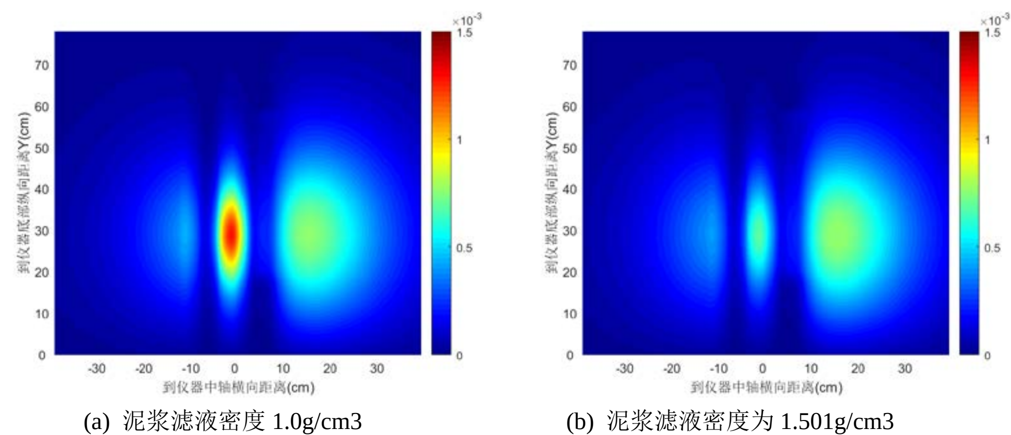
图 3-12 不同井眼水矿化度仪器响应规律图

Fig.3-12 Neutron porosity response of different borehole water mineralizations

3.1.4 泥浆滤液密度的影响

泥浆滤液密度影响井眼流体的宏观俘获截面与快中子的平均慢化距离，会对探测器区域的热中子分布产生影响。为了研究泥浆滤液密度对中子孔隙度响应的影响，往井眼流体中增添膨润土（密度 2.2g/cm^3）和重晶石（密度 4.3g/cm^3，BaSO4），改变井眼滤液密度为 1.0g/cm^3、1.141 g/cm^3、1.381 g/cm^3、1.501 g/cm^3；在如图 3-7 所示的贴壁和居中两种测量模式下，研究模拟不同泥浆滤液密度下热中子场分布和计数比的地层孔隙度响应规律。

泥浆滤液密度影响井眼区的中子减速和俘获能力，为了定性研究泥浆滤液密度对热中子的产生和俘获影响，记录仪器地层剖面的热中子场分布，如图 3-13 所示。左图为仪器贴井壁时泥浆滤液密度为 1.0g/cm^3，右图为泥浆滤液密度为 1.501 g/cm^3。结果显示，泥浆滤液密度对热中子场分布的影响主要在井眼区，对地层区的热中子场分布影响较小。

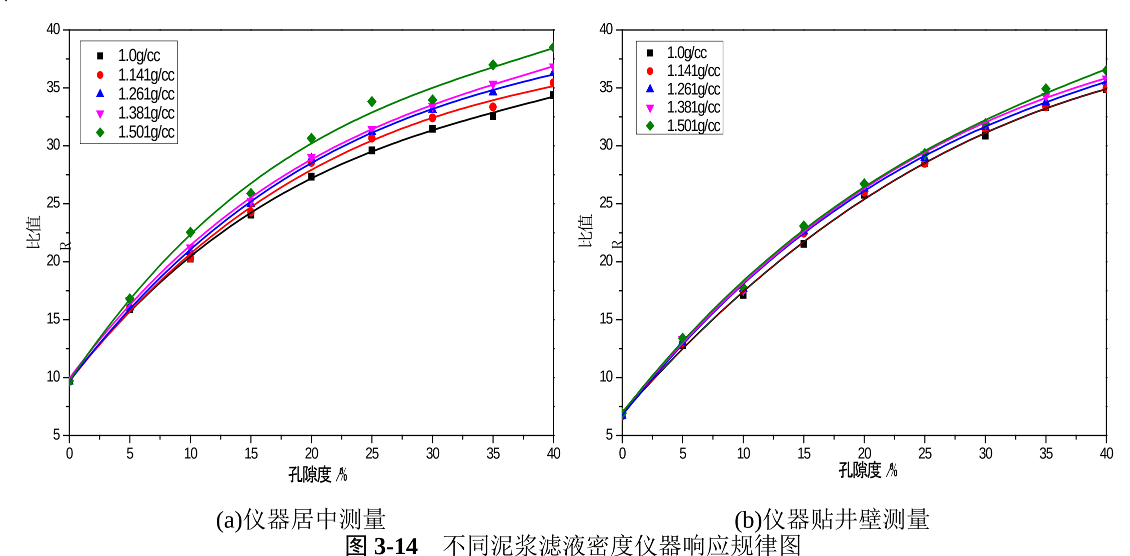


(a) 泥浆滤液密度 1.0g/cm3　　　　(b) 泥浆滤液密度为 1.501g/cm3

图 3-13　不同泥浆滤液密度对热中子场分布的影响

Fig.3-13　Thermal neutron field distributions for slurry filtrate densities

随着泥浆滤液密度的增加，井眼区的中子俘获能力增大，近远探测器的响应灵敏度不同，远探测器计数率的下降幅度大于近探测器，近远计数比 R 增大。在贴井壁测量情况下，泥浆滤液密度的变化基本不会对近远比计数产生影响，因此仅需要对居中条件下的结果进行校正。对比仪器居中和贴井壁两种测量方式，贴壁测量结果几乎不受泥浆滤液密度的影响，而剧中测量由于井眼区的泥浆密度影响，地层孔隙度结果出现失真。



(a)仪器居中测量　　　　(b)仪器贴井壁测量

图 3-14　不同泥浆滤液密度仪器响应规律图

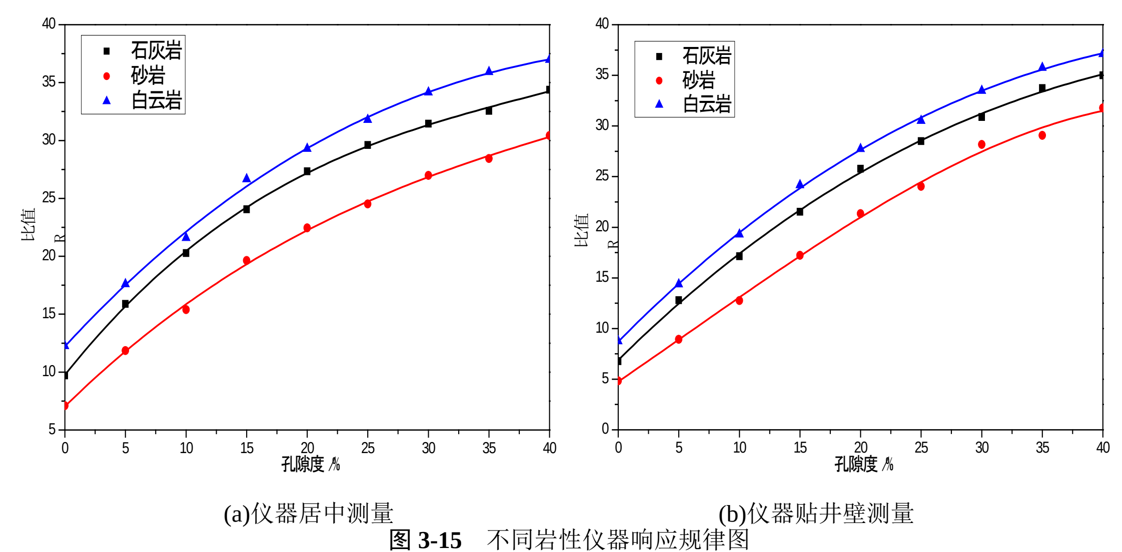
Fig.3-14　Neutron porosity response of different slurry filtrate densities

3.2 地层环境对随钻中子孔隙度的影响规律

3.2.1 地层岩性的影响

不同地层骨架矿物对中子的慢化及俘获能力差异巨大，在条件一定下，砂岩热中子计数率大于灰岩大

于白云岩。为了研究岩性对随钻中子孔隙度近远计数比的影响，设置模型地层为饱含淡水的纯砂岩、石灰岩和白云岩。在如图 3-7 所示的贴壁和居中两种测量模式下，模拟近远计数比 R 在不同岩性下的地层孔隙度响应规律，结果如图 3-15 所示。



(a)仪器居中测量　　　　　　　　　　(b)仪器贴井壁测量

图 3-15　不同岩性仪器响应规律图

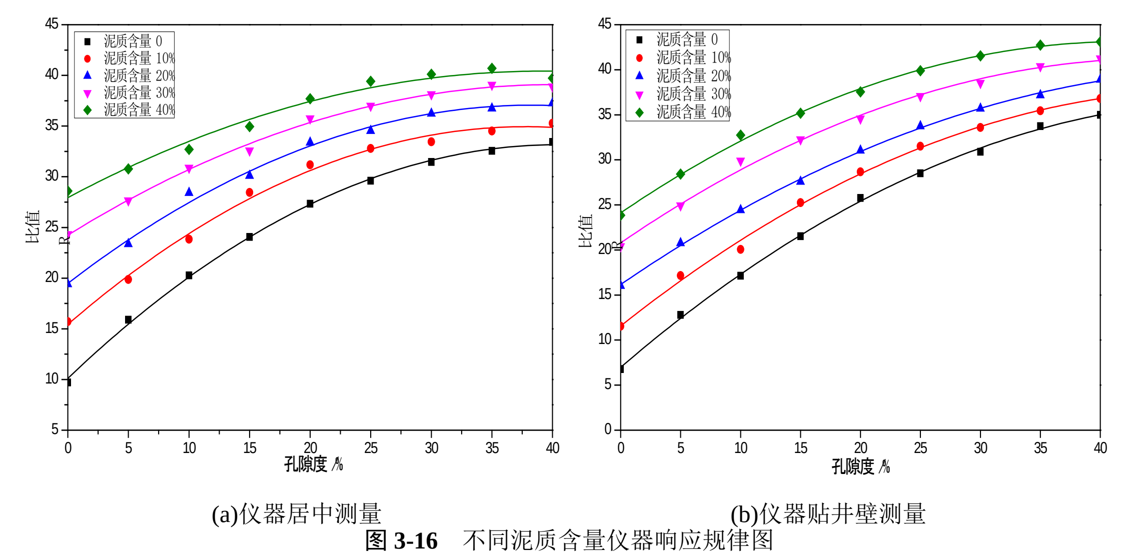
Fig.3-15　Neutron porosity response with different lithologies

近探测器热中子计数率主要受地层含氢指数影响，白云岩是三种岩性地层中含氢指数和种子减速能力最大的，因此近探测器出热中子计数率高；远探测器主要受地层宏观俘获截面影响，白云岩的热中子宏观俘获能力是最大的，因此白云岩的远探测器计数率低；因此在相同孔隙度条件下，砂岩计数比最大，白云岩计数比最小。

仪器居中测量时受井眼流体的影响较大，快中子在流体中得到充分减速，因此近探测器热中子计数率高于贴井壁测量；同时井眼流体对热中子由很强的俘获作用，因此远探测器居中测量计数率低于贴壁测量；故仪器的测量方式会影响计数比响应。

3.2.2 泥质含量影响

泥质与地层骨架的含氢量不同，对中子的慢化与俘获能力差异明显，为了研究泥质含量对探测器热中子计数响应的影响，改变地层的泥质含量为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%，模拟得到不同地层泥质含量条件下，随钻 D-T 源中子孔隙度仪器近远热中子计数率比值 R 随地层孔隙度的变化规律，结果如图 3-16 所示。



(a)仪器居中测量　　　　　　　　　　(b)仪器贴井壁测量

图 3-16　不同泥质含量仪器响应规律图

Fig.3-16　Neutron porosity response with different mud contents

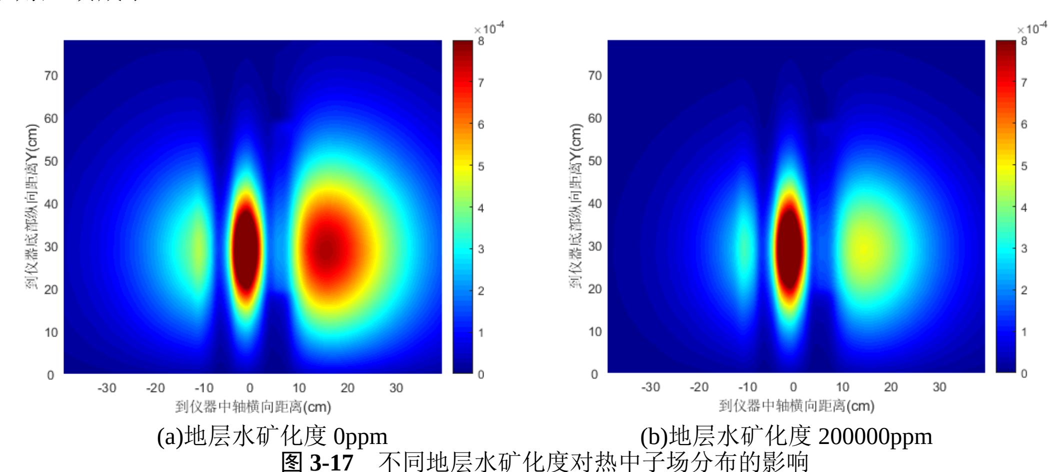
泥质主要成分为细粉砂和湿黏土，且泥质中含结晶水和束缚水，其含氢指数高于纯岩石骨架，对快中子的减速能力较强，近探测器计数增大；同时，黏土矿物中包含多种热中子俘获截面大的核素，地层对热

中子俘获能力增大，因此远探测器计数降低。因此，随着泥质含量的增加，近远计数比增大。在不同的测量方式下，泥质含量对地层孔隙度的近远比响应影响都很大，在低孔地层影响格外明显。

3.2.3 地层水矿化度的影响

地层水矿化度影响热中子场分布，会对地层探测结果产生很大的影响。为了研究地层水中氯元素的热中子俘获作用对近远探测器中子计数率的影响，设置包含水的石灰岩地层模型，改变地层孔隙水矿化度为 0、50000ppm、100000ppm、150000ppm、200000ppm；在如图 3-7 所示的贴壁和居中两种测量模式下，研究模拟不同地层水矿化度下热中子场分布和计数比的地层孔隙度响应规律。

地层水矿化度对热中子场分布有影响，为了定性研究地层水矿化度对热中子的俘获影响，记录仪器模型剖面的热中子场分布，如图 3-17 所示。左图为仪器贴井壁时地层矿化度为 0ppm，右图为井眼矿化度为 200000ppm。结果显示，当地层水矿化度变大的时候，地层中的热中子俘获能力增强，热中子通量减小，同时有效探测区域减小。

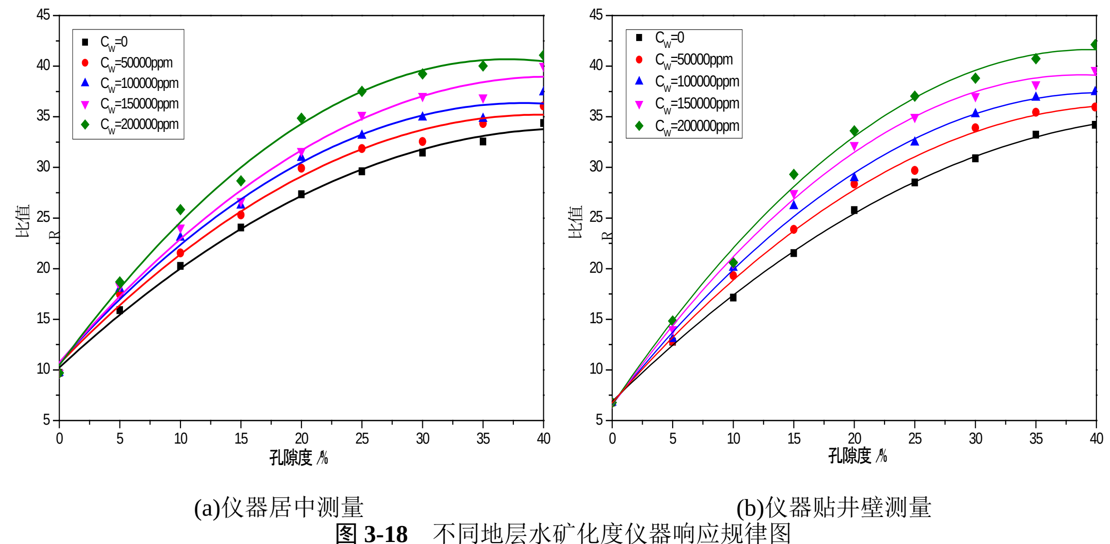


(a)地层水矿化度 0ppm (b)地层水矿化度 200000ppm

图 3-17 不同地层水矿化度对热中子场分布的影响

Fig.3-17 Thermal neutron field distributions for different formation water mineralizations

记录居中测量和贴井壁测量条件下，地层水矿化度对探测器近远比的影响。与井眼水矿化度的规律相同，相同孔隙度条件下近远比 R 随着矿化度的增加而增加。岩石对热中子的俘获能力主要与含氯量相关，随着地层水矿化度越高，近远探测器计数率均下降，但由于远探测器对地层信息更加敏感，因此下降更剧烈。因此地层水矿化度在影响近远比响应规律外，还会降低仪器的测量精度。对比仪器居中和贴井壁两种测量方式，在地层水存在矿化度时地层孔隙度测量结果均失真。



(a)仪器居中测量 (b)仪器贴井壁测量

图 3-18 不同地层水矿化度仪器响应规律图

Fig.3-18 Neutron porosity response with different formation water mineralizations

4 总结

（1）随钻 D-T 中子孔隙度测量仪器在钻铤结构中不同位置时，热中子场分布和探测器响应不同。仪

器在钻铤上侧开槽放置时，钻铤两侧的中子分布不均匀，背部中子通量几乎可以忽略；当导流通道环绕仪器放置时，钻铤两侧的中子通量基本相同，但由于钻铤的屏蔽作用，地层中的热中子通量仅为侧开槽放置的 2/3。两种放置方式的近远比对地层孔隙度的响应也有差异，当仪器放置于导流通道中时，远计数比对地层孔隙度的灵敏度为侧开槽的 2.7 倍。

（2）在钻铤与井壁贴合的情况下，井眼及配套钻铤尺寸、井眼水矿化度和泥浆滤液密度三种测量环境影响因素对近远比的地层孔隙度响应影响较小；当钻铤居中时，井眼及配套钻铤尺寸是环境影响因素中的主控因素，在低孔地层中，井眼及钻铤尺寸的影响程度为井眼水矿化度和泥浆滤液密度的 4.2 倍，高孔地层中为 1.7 倍。

（3）地层岩性、泥质含量和地层水矿化度三种地层环境因素中，地层岩性作为地层属性在不同孔隙度下的影响几乎为常量，泥质含量的影响程度在低孔条件下是地层水矿化度影响程度的 2.9 倍，高孔隙度下为 1.48 倍，因此地层泥质含量为地层环境影响的主控因素。

致谢 感谢国家自然基金项目《基于伽马-伽马反符合的随钻地层元素测井方法研究》（项目编号：42174147）对本研究的支持。

参考文献

1 张锋, 靳秀云, 侯爽. D-T 脉冲中子发生器随钻中子孔隙度测井的蒙特卡罗模拟[J]. 同位素, 2010, **23**(1): 15−21. DOI: 10.3724/SP.J.1231.2010.06586.

2 Zhang Q, Chalitsios C, Configuration design of detector shielding for wireline and MWD/LWD down-hole thermal neutron porosity tools[P]. U.S. Patent: 8,080,781, 2011-12-20.

3 骆庆锋, 范宇翔, 梁羽佳, 等. 可控源中子仪器钻铤结构对测量影响的数值模拟研究[J]. 石油仪器, 2015, **1**(1): 27−29. DOI: 10.19459/j.cnki.61-1500/te.2015.01.009.

4 李伟, 赵帆. 一种随钻中子孔隙度测井系统的抗干扰设计[J]. 西安邮电大学学报, 2017, **22**(3): 121−126. DOI: 10.13682/j.issn.2095-6533.2017.03.022.

5 付亚平, 吴文圣, 尚修盛, 等. 不同井眼条件下的随钻中子和密度测井响应特性研究[J]. 石油天然气学报, 2013, **35**(3): 99−105. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9752.2013.03.021.

6 袁超, 刘翰林, 张锋, 等. 随钻与电缆脉冲中子孔隙度测井响应差异研究[J]. 西南石油大学学报（自然科学版）, 2016, **38**(2): 79−85. DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2014.01.13.08.

7 Daghar A, Ahmed K, Budebes S, et al. How a Small Difference Can Make a Big Difference in Understanding Complex Fluids[C]. SPWLA 54th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, New Orleans, Louisiana, USA, 2013.

8 Daghar A, Ahmed K, Budebes S, Gzara K, et al. How a Small Difference can make a big Difference in Understanding Complex Fluids[J]. 2013

9 McCleskey M, Inanc F, Koudelka J, et al. Accurate Neutron Porosity Logging in High Temperature Environments[C]. SPWLA 58th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, Oklahoma City, Oklahoma, USA, 2017.